第38卷 第2期
2021年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 2
Mar. 2021

伊犁河谷西北部地下水化学特征及成因分析

艾力哈木·艾克拉木[1,2,3]， 周金龙[1,2,3]， 张 杰[1,2,3]，
魏 兴[1,2,3]， 余 东[1,2,3]， 陈劲松[1,2,3]

（1. 新疆农业大学水利与土木工程学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 新疆水文水资源工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830052；3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830052）

摘 要：为探究新疆伊犁河谷西北部地下水化学特征及成因，运用数理统计以及Piper三线图、Gibbs图、离子比图等方法，对2018年伊犁河谷西北部地下水取样监测数据进行分析。结果表明：(1) 研究区地下水属于总硬度偏高的弱碱性水，地下水化学组分含量整体变异性不大，主要阳离子为Ca^{2+}，主要阴离子为HCO_3^-。(2) 地下水水化学类型以HCO_3-Ca、$HCO_3\cdot SO_4$-Ca、$HCO_3\cdot SO_4$-Ca·Mg、$HCO_3\cdot SO_4$-Ca·Na和HCO_3-Ca·Mg型为主。(3) 研究区地下水化学组分主要受岩石溶滤作用控制，蒸发-浓缩作用及阳离子交换作用对地下水化学组分有一定的贡献，个别地下水水样点可能受到人为活动的影响。(4) 地下水中的Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}主要来自岩盐、石膏等蒸发岩的溶解，Ca^{2+}和Mg^{2+}主要来自方解石、白云石和石膏等矿物溶解。

关键词：伊犁河谷西北部；地下水；化学特征；Gibbs图；离子比；新疆

地下水作为水资源的重要组成部分，是推动社会经济发展、构成并影响生态环境以及维持区域环境稳定的重要因素[1]。对于干旱-半干旱地区而言，地下水是主要的供水来源，超过半数的工业用水及三分之一的农业用水来源[2]。地下水化学组分既受气候、大气降水、地质构造、矿区开采和人类活动等因素影响，也受地层岩性及溶滤作用控制[3-5]。随着对地下水化学组分研究的不断深入，国内外诸多学者结合区域水文地质、地层岩性等条件，用阿廖金分类法[6-7]、Piper三线图[8-9]及Durov三线图[10]等方法对水化学类型进行分类，并对不同区域地下水主要化学组分的来源和控制因素进行了研究。

诸多学者对研究区地下水进行了不同程度的研究。段东伟[11]以区域地下水系统理论为基础，结合D、^{18}O同位素检测结果揭示潜水和承压水有着相同的起源，且承压水和潜水有一定的水力联系；邵杰等[12]以伊犁河流域为研究区，分析水化学特征和水化学类型沿不同剖面的变化规律及地下水流循环规律；邱余波等[13]以反演层间氧化流体在平面上的推进情况，研究西山窑组古地下水的“补-径-排”特征，最终确定阔斯加尔铀矿地区地下水补给来源。上述研究主要说明了研究区地下水化学特征主要受自然因素和含水层矿物等因素影响，对地下水化学组分及其矿物来源有待深入研究。本文在全区范围内系统地对地下水化学类型进行分类，并分析地下水化学组分的来源，确定影响地下水化学特征的主要矿物组分；研究结果有助于深入了解地下水的起源和演化规律，对区域水资源的合理开发利用和保护提供了重要的理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

伊犁河谷处于新疆北天山的科古秦山、博洛霍罗山、中天山的哈尔克它乌山和那拉提山之间。区内水系发育的主要河流包括伊犁河、巩乃斯河、特克斯河和喀什河，年平均地表水径流量165.5×10^8 m^3，占新疆地表水总量的20.7%，年降水量为309×10^8 m^3，地下水总补给量为52.45×10^8 m^3，在新疆属于水资源丰富地区[14]。伊犁河谷西北部位于我国西

收稿日期：2020-04-13； **修订日期：**2020-11-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目(41662016)；第三次新疆地下水资源调查与评价项目(2008-2009)资助
作者简介：艾力哈木·艾克拉木(1993-)，男，硕士研究生，主要从事地下水水质演化研究. E-mail: 2744192261@qq.com
通讯作者：周金龙. E-mail: zjzhoujl@163.com

北边陲天山西段,四面环山,地势呈由东向西降低趋势,呈半湿润大陆性中温带气候。

研究区(图1)内第四纪地层相对发育,包含不同时期、不同成因类型的堆积物[15]。沿伊犁河东西走向,第四系地层厚度逐渐增大,最厚可达千米,地层结构多次从单层到多层交替,出现不同粗细的岩层颗粒,伊犁河两侧主要呈现细颗粒多层岩性特征[16]。受伊犁河谷地质条件的影响,地貌从北向南依次为倾斜含砾质细土平原及冲洪积细土平原的特征(图1和图2),平原区中部沿伊犁河从东向西主要以冲洪积细土平原特征为主。

地下水类型主要包括松散岩类孔隙水、中新生界碎屑岩类裂隙孔隙水以及基岩裂隙水,伊犁河谷平原区主要分布松散岩类孔隙水,大部分地下水埋深较浅水位≤10 m,以伊犁河为对称轴向山区地下水埋深逐渐加深,最大埋深≥100 m[17]。地下水主要接受降雨入渗、河道渗漏、水库入渗、暴雨洪流入渗以及地下水侧向径流等方式补给,并以人工开采、泉水溢出、潜水蒸发蒸腾以及向下游侧向流出等方式排泄。

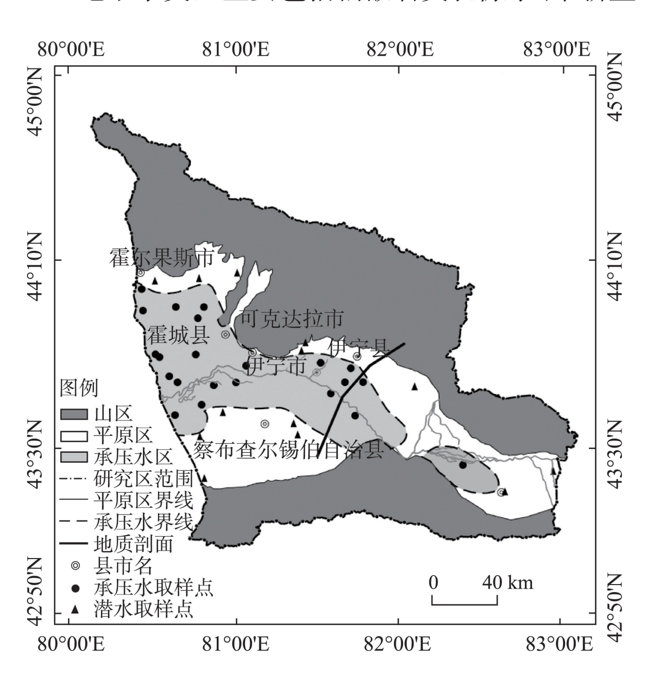


图1 研究区位置与地下水水质监测点分布示意图

Fig. 1 The location of the study area and the distribution of groundwater quality monitoring sights

1.2 水样采集和测试

2018年6—10月共取地下水样品35组(井深15~200 m),其中承压水23组,潜水12组(图2)。聚乙烯塑料水样瓶先用所取水样润洗3次后取水样,贴好标签密封保存。采用德国HI9829高精度便携式多参数综合水质测定仪现场测定包括pH、水温和电导率等多项指标。由新疆地矿局第二水文工程地质大队实验室完成包括K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}和NO_3^-等离子的浓度测定。其中,K^+和Na^+采用火焰原子吸收分光光度法;Ca^{2+}和Mg^{2+}采用乙二胺四乙酸滴定法;Cl^-采用硝酸银容量法;SO_4^{2-}采用硫酸钡比浊法;HCO_3^-和CO_3^{2-}采用酸碱滴定法;NO_3^-采用紫外分光光度法。各离子指标检出限均为0.05 mg·L^{-1},阴阳离子电荷平衡之差<±5%。

1.3 研究方法

运用SPSS 22.0软件对水样中离子组分浓度进行描述性统计,采用Piper三线图对区域地下水化学类型进行分类,并通过Gibbs图解、离子浓度比值和PHREEQC软件等方法分析研究区不同控制因素作用下地下水化学特征及成因。

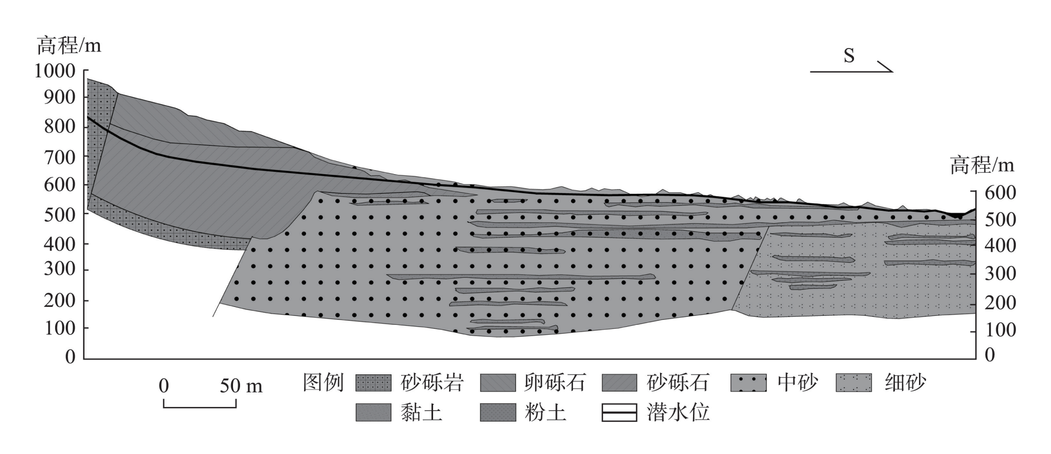


图2 研究区南北地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of the study area in South-North direction

2 结果与分析

2.1 水化学特征

地下水中潜水和承压水水化学组分含量整体变异性不大，最大变异系数为1.19（表1）。地下水pH范围为6.90~8.10，平均值为7.66，整体呈中性-偏弱碱性。TDS范围为111.00~2318.92 mg·L^{-1}，地下水水样中97.1%为淡水（TDS<1 g·L^{-1}），2.9%为微咸水（TDS为1~3 g·L^{-1}）。地下水整体为淡水，TDS整体较低，只有1个水样点TDS值偏高。地下水总硬度整体偏高，变化范围为151.00~2920.00 mg·L^{-1}，平均值为604.07 mg·L^{-1}，根据地下水质量标准（GB/T 14848-2017），研究区地下水软水（≤300 mg·L^{-1}）、硬水（300~450 mg·L^{-1}）和极硬水（≥450 mg·L^{-1}）占比分别为25.7%、25.7%和48.6%。

表1 地下水水化学参数统计

Tab. 1 Statistical results of hydrochemical parameters of groundwater

项目	K^+	Na^+	K^++Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	pH	总硬度	TDS	NO_3^-
最大值	9.01	247.01	251.76	248.89	179.35	267.01	1109.24	523.17	8.10	2920.00	2318.92	26.52
最小值	0.87	3.03	4.10	26.11	6.43	2.82	26.50	60.76	6.90	151.00	111.00	0.84
平均值	2.77	42.43	45.20	79.15	31.32	43.47	154.57	235.32	7.66	604.07	448.73	10.19
中位数	2.35	27.95	31.94	63.78	24.30	35.98	117.77	214.81	7.78	435.00	320.02	3.11
标准差	1.79	45.20	46.14	44.96	30.73	48.83	183.57	103.81	0.37	494.74	387.65	10.42
变异系数	0.65	1.06	1.02	0.57	0.98	1.12	1.19	0.44	0.05	0.82	0.86	1.02

注：pH为无量纲，其他单位为mg·L^{-1}。

由表1可知，K^+变化范围为0.87~9.01 mg·L^{-1}，平均值为2.77 mg·L^{-1}；Na^+变化范围为3.03~247.01 mg·L^{-1}，平均值为42.43 mg·L^{-1}；Ca^{2+}变化范围为26.11~248.89 mg·L^{-1}，平均值为79.15 mg·L^{-1}；Mg^{2+}变化范围为6.43~179.35 mg·L^{-1}，平均值为31.32 mg·L^{-1}；Cl^-变化范围为2.82~267.01 mg·L^{-1}，平均值为43.47 mg·L^{-1}；SO_4^{2-}变化范围为26.50~1109.24 mg·L^{-1}，平均值为154.57 mg·L^{-1}；HCO_3^-变化范围为60.76~523.17 mg·L^{-1}，平均值为235.32 mg·L^{-1}。研究区35组水样中，9组水样检测到NO_3^-浓度，浓度≥20 mg·L^{-1}的有2个，NO_3^-浓度最大为26.52 mg·L^{-1}，平均值为10.19 mg·L^{-1}。

地下水中阳离子浓度Ca^{2+}>Mg^{2+}>Na^++K^+，阴离子浓度HCO_3^->SO_4^{2-}>Cl^-，研究区地下水阳离子以Ca^{2+}为主，阴离子中以HCO_3^-为主。

2.2 水化学类型划分

Piper三线图能较好地反映地下水中各主要组分浓度之间的联系，对地下水化学类型进行分类[18]。研究区地下水主要水化学类型为HCO_3-Ca、HCO_3·SO_4-Ca、HCO_3·SO_4-Ca·Mg、HCO_3·SO_4-Ca·Na以及HCO_3-Ca·Mg型（图3），局部区域地下水化学类型呈SO_4-Ca·Mg、SO_4-Ca、HCO_3·Cl-Ca·Na以及HCO_3·SO_4-Na·Mg型，地下水TDS总体偏低，大部分地下水水样点TDS小于1 g·L^{-1}，pH呈中性-弱碱性为主，水质总体较好，符合饮水标准[19]。

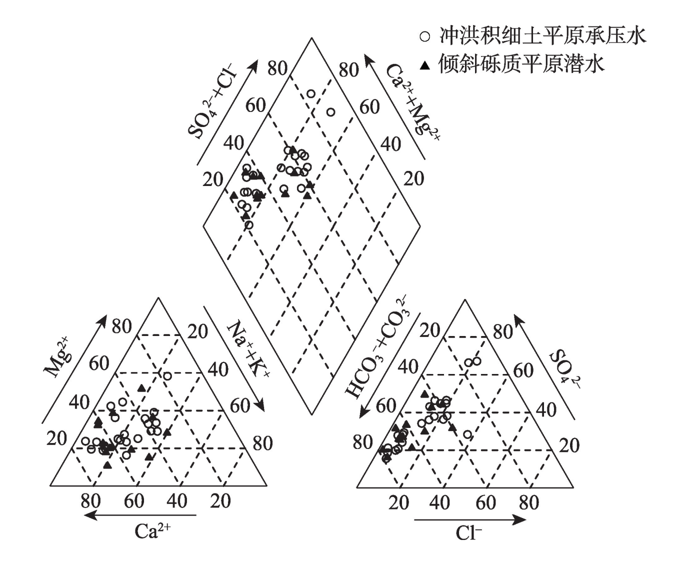


图3 研究区地下水Piper三线图

Fig. 3 Trilinear chart by Piper of groundwater in the study area

3 讨 论

3.1 地下水主要控制因素

Gibbs图可以判断大气降水、蒸发-浓缩和岩石溶滤作用等因素影响下的水化学演化特征，诸多学者也利用Gibbs图反映地下水各化学组分的形成机

制[20-21]。由于地下水在含水层中滞留时间较长,受水岩相互作用较明显,在用Gibbs图分析地下水水化学特征时,可适当扩大岩石溶滤作用的范围[22]。

由研究区潜水和承压水Gibbs图可知(图4),地下水水样主要分布在"岩石溶滤作用"区间,部分水样点分布在"蒸发浓缩作用"区间。结合地貌特征,冲洪积细土平原承压水和倾斜砾质平原潜水均主要受岩石溶滤作用的影响,部分受岩石溶滤和蒸发-浓缩双重作用影响。研究区Gibbs图$\gamma Cl^-/\gamma(Cl^-+HCO_3^-)$有良好的聚集性,而$\gamma Na^+/\gamma(Na^++Ca^{2+})$没有明显的聚集性,表明地下水可能还受到阳离子交换作用和人类活动等其他因素的影响。

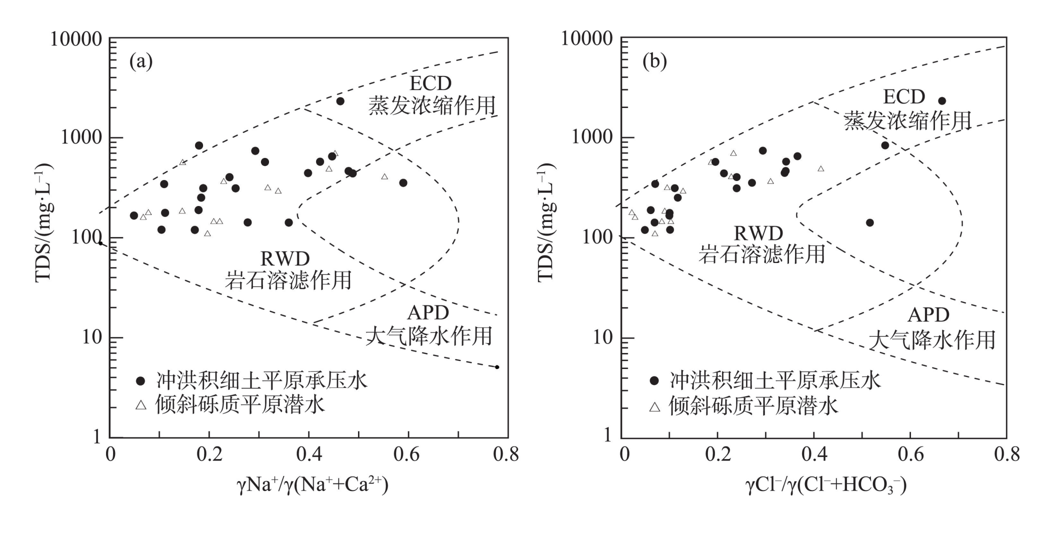


图4　研究区地下水Gibbs图

Fig. 4　Gibbs diagram of groundwater in the study area

3.2　阳离子交换作用

由Gibbs图(图4)$\gamma(Na^+)/\gamma(Na^++Ca^{2+})$的散乱分布可以看出,研究区地下水化学组分可能还受阳离子交换作用的影响。阳离子交换作用是指一定条件下水体中的Na^+与K^+离子与土壤颗粒中的其他阳离子进行交换[23]。通常由$\gamma(Na^+-Cl^-)$与$\gamma[(HCO_3^-+SO_4^{2-})-(Ca^{2+}+Mg^{2+})]$之间的比值关系来判定阳离子交换作用,当$\gamma(Na^+-Cl^-)$与$\gamma[(HCO_3^-+SO_4^{2-})-(Ca^{2+}+Mg^{2+})]$值都>0时,可以确定发生阳离子交换作用[24]。潜水和承压水水样点大部分落在$\gamma(Na^+-Cl^-)>0$,$\gamma[(HCO_3^-+SO_4^{2-})-(Ca^{2+}+Mg^{2+})]>0$区间(图5),且水样点主要集中在1:1线附近,表明研究区地下水的阳离子交换作用明显,鉴于阳离子交换作用多发生于砂土,细土等地层区域,结合研究区地层特征,阳离子交换作用多发生在倾斜含砾质细土平原及冲洪积细土平原区域。

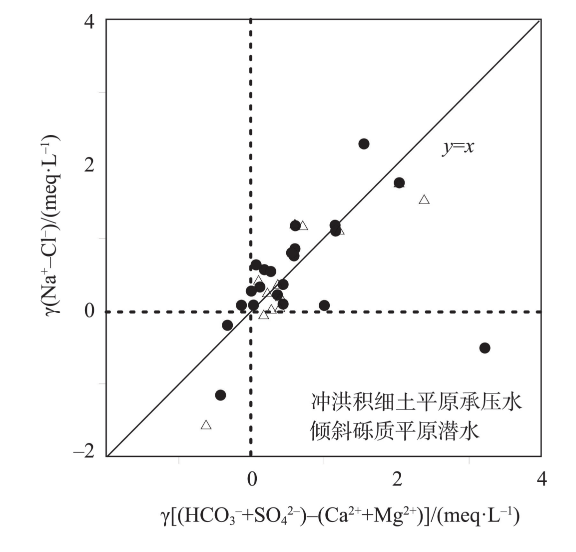


图5　$\gamma(Na^+-Cl^-)$与$\gamma[(HCO_3^-+SO_4^{2-})-(Ca^{2+}+Mg^{2+})]$比例关系

Fig. 5　Ratio relationship between $\gamma(Na^+-Cl^-)$ and $\gamma[(HCO_3^-+SO_4^{2-})-(Ca^{2+}+Mg^{2+})]$

3.3　岩石溶滤作用

在风化和水-岩相互作用下,岩石溶解进入地下水中,形成地下水水化学组分,运用离子比值图法对岩石溶滤作用进行分析,可以判断地下水中化学组分的矿物来源[21]。

利用$\gamma(Na^++K^+)$与$\gamma(Cl^-)$比值关系可以判断地下水是否有硅铝酸盐矿物溶解[25]。研究区绝大多数地下水水样点落在$\gamma(Na^++K^+)/\gamma(Cl^-)=1$上方(图6a),表明地下水水化学组分除了受岩盐溶解影响外,还受钠长石等其他含钠硅酸岩盐矿物溶解影响。由

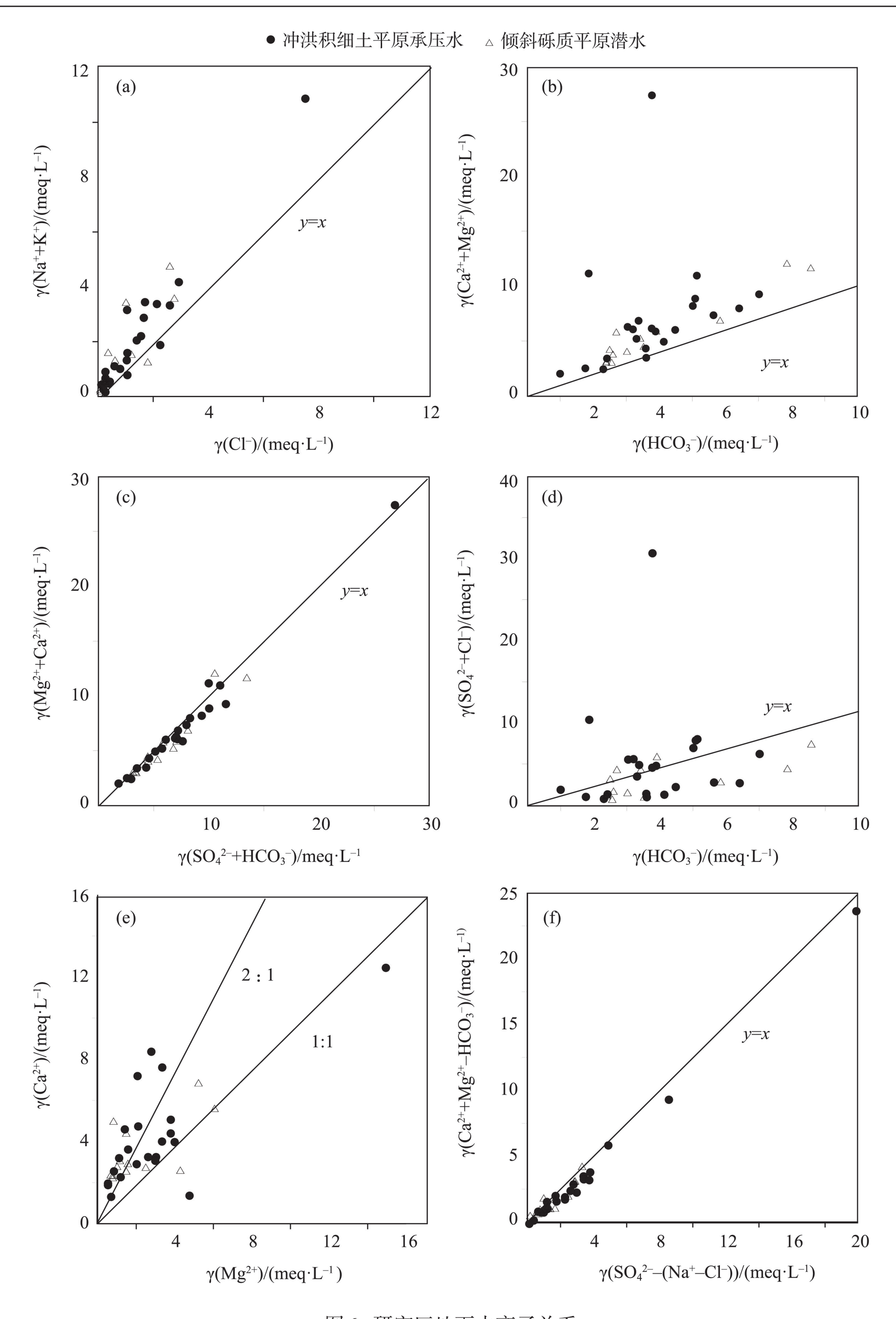


图6 研究区地下水离子关系

Fig. 6 Ion ratio diagrams of groundwater in the study area

于地下水中 Na^{+}+K^{+}大多数在1:1线之上，且地下水受到明显的阳离子交换作用影响，使得 Na^{+}+K^{+}浓度高于 Cl^{-}浓度。

地下水中的 Ca^{2+}与 Mg^{2+}主要来自碳酸盐和蒸发岩的风化溶解[24]。研究区地下水水样点均落在 $\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-)=1$ 上方（图6b），表明地下水除了方解石和白云石的风化溶解外，还有其他含 Ca^{2+}矿物的溶解。$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})$呈明显的一元线性关系（图6c），并且大多数水样点落在直线 $\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})/\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})=1$ 下方，表明蒸发岩石

(石膏)风化溶解参与地下水中Ca^{2+}的形成[26-27]。

$\gamma(SO_4^{2-}+Cl^-)$与$\gamma(HCO_3^-)$比例关系来反映地下水中碳酸盐的溶解情况[28]。研究区地下水取样点大致分布在$\gamma(SO_4^{2-}+Cl^-)/\gamma(HCO_3^-)=1$两侧,有48.6%取样点落在直线上方,还有51.4%的取样点落在直线下方(图6d),表明地下水水化学受蒸发岩和碳酸岩溶解作用共同影响。利用$\gamma(Ca^{2+})$与$\gamma(Mg^{2+})$关系判断地下水Ca^{2+}的主要来源,当$\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})$值>2,表明石膏溶解为主导因素,当$\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})$值在1~2之间,表明碳酸盐为地下水化学组分的主要来源[29]。地下水水样点$\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})$范围为0.29~6.06(图6e)(平均值为2.15,35个水样点中17组水样点$\gamma(Ca^{2+})/\gamma(Mg^{2+})$值>2,12组在1~2之间。表明研究区地下水受碳酸岩和石膏风化溶解作用双重影响,其中地下水中Ca^{2+}主要来自方解石、白云石和石膏溶解。

地下水中的SO_4^{2-}的来源主要包括硫化物氧化、石膏溶解等。由$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^-)$与$\gamma[SO_4^{2-}-(Na^+-Cl^-)]$的关系可以判断地下水中$SO_4^{2-}$矿物来源[30]。用$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^-)$来表征地下水中石膏溶解产生的$Ca^{2+}$浓度,用$\gamma[SO_4^{2-}-(Na^+-Cl^-)]$表征石膏溶解产生的$SO_4^{2-}$浓度,当$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^-)$与$\gamma[SO_4^{2-}-(Na^+-Cl^-)]$的比值为1时,表明水样中$SO_4^{2-}$全部来自石膏溶解。研究区水样全部落在$\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^-)/\gamma[SO_4^{2-}-(Na^+-Cl^-)]=1$附近(图6f),绝大多数水样点分布在$y=x$线附近,表明地下水中的$SO_4^{2-}$主要来自石膏和芒硝溶解。

3.4 蒸发浓缩作用

在蒸发-浓缩作用控制下,地下水中溶解度大的盐类聚集,溶解度小的盐类沉淀[7]。利用饱和指数(SI)对地下水矿物相对饱和状态进行分析,当SI<0表示该矿物相对水溶液未达到饱和状态,矿物溶解;当SI=0表示该矿物相对水溶液正处于平衡状态;当SI>0表示该矿物相对水溶液处于过饱和状态,矿物沉淀。

由表2可知,潜水和承压水中岩盐、石膏的饱和指数SI均小于0,表明研究区地下水中岩盐和石膏均未达到饱和状态,发生溶解;大多数水样点文石、方解石、白云石等矿物饱和指数SI大于0,部分小于0,表明地下水中文石、方解石和白云石等碳酸盐矿物基本上处于饱和状态;在蒸发-浓缩作用的影响下,导致地下水中Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}等溶解聚集,Ca^{2+}、Mg^{2+}和CO_3^{2-}等沉淀析出,共同影响地下水TDS。

潜水和承压水均主要接受大气降水补给,地下水流方向大致为从山区向平原区[15]。研究区山区降水量较大,平原区地下水主要受地表径流入渗补给、大气降雨和冰雪融水的侧向补给。王骞迎[31]通过研究氢氧稳定同位素特征,发现伊犁河谷平原区潜水和承压水均受大气降雨补给,且不同水文地质单元之间存在较强的水力联系。段东伟[11]等经过对伊犁河谷西部平原区地下水D、^{18}O同位素分析,得出研究区承压水分布区域与潜水有重叠,并且承压水和潜水有相同的起源。研究区潜水和承压均受地表径流和大气降雨补给,并且从地下水补给区(山前)到排泄区(伊犁河)地表水和地下水多次交替补给,表明研究区潜水和承压水可能有相同的起源,并存在一定的水力联系。

4 结 论

(1)伊犁河谷西北部地下水总体呈弱碱性,地下水总硬度偏高;地下水各组分含量整体变异性不大,其中阳离子以Ca^{2+}为主,阴离子以HCO_3^-为主。

(2)伊犁河谷西北部地下水主要水化学类型为HCO_3-Ca、$HCO_3\cdot SO_4$-Ca、$HCO_3\cdot SO_4$-Ca·Mg、$HCO_3\cdot SO_4$-Ca·Na以及HCO_3-Ca·Mg型。

(3)地下水化学组分主要受岩石溶滤作用影响,蒸发-浓缩作用对地下水化学组分有一定的贡

表2 研究区地下水主要矿物饱和指数(SI)

Tab. 2 Saturation index (SI) of the major minerals in groundwater of the study area

地下水类型	SI值	文石	方解石	白云石	石膏	岩盐	地下水类型	SI值	文石	方解石	白云石	石膏	岩盐
承压水	最大值	0.71	0.86	1.41	−0.51	−5.84	潜水	最大值	0.75	0.90	1.74	−1.27	−6.62
	最小值	−0.68	−0.54	−1.28	−2.30	−9.09		最小值	−0.10	0.05	−0.30	−2.25	−9.42
	平均值	0.16	0.31	0.45	−1.57	−7.60		平均值	0.17	0.32	0.39	−1.71	−7.98
	SI>0占比/%	77.5	82.0	82.0	0.0	0.0		SI>0占比/%	69.6	100.0	62.0	0.0	0.0
	SI<0占比/%	22.5	18.0	18.0	100.0	100.0		SI<0占比/%	30.4	0.0	38.0	100.0	100.0

献，部分区域地下水存在一定阳离子交换作用。利用离子浓度比值法可以得出地下水中的Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}主要来自岩盐、石膏等蒸发岩的溶解；Ca^{2+}和Mg^{2+}主要来自方解石、白云石和石膏等矿物溶解；蒸发-浓缩作用下地下水中Na^+、Cl^-和SO_4^{2-}等溶解聚集，Ca^{2+}、Mg^{2+}和CO_3^{2-}等沉淀析出，共同影响地下水TDS。

参考文献(References)：

[1] 水利部水资源司. 21世纪初期中国地下水资源开发利用[R]. 北京:中国水利水电出版社, 2004. [Department of Water Resources, Ministry of Water Resources. Development and Utilization of Groundwater Resources in China in the early 21st Century[R]. Beijing: China Water and Power Press, 2004.]

[2] 史志广. 伊犁河谷西北部平原区地下水功能评价[D]. 三河:防灾科技学院, 2018. [Shi Zhiguang. Evaluation of Groundwater Function in the Northwest Plain of Yili River Valley[D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention, 2018.]

[3] 赵玮, 何建华, 马金珠. 疏勒河流域玉门-瓜州盆地地下水化学演化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 32(1): 56-64. [Zhao Wei, He Jianhua, Ma Jinzhu. Chemical evolution characteristics of groundwater in Yumen-Guazhou Basin in Shule River Basin[J]. Arid Zone Research, 2012, 32(1): 56-64.]

[4] 邵跃进, 罗光明, 王建, 等. 新疆克里雅河上游主要离子化学特征及其成因[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1021-1029. [Shao Yuejin, Luo Guangming, Wang Jian, et al. Hydrochemical characteristic and formation causes of main ions in water of the Keriya River, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1021-1029.]

[5] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. 干旱区研究 2019, 36(4): 791-799. [Ren Xiaozong, Li Jiangang, Liu Min, et al. Hydrochemical composition of natural waters and its controlling factors in the East Hunshandak Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 791-799.]

[6] 曾妍妍, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆祁漫塔格地区地表水水化学特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 64-70. [Zeng Yanyan, Zhou Jinlong, Jia Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristic and causes of surface water in Qimantage area, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(6): 64-70.]

[7] 孙英, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什噶尔河流域地表水水化学季节变化特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(8): 128-133. [Sun Ying, Zhou Jinlong, Nai Weihua, et al. Seasonal variation characteristic and causes of surface water chemistry in Kashgar River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(8): 128-133.]

[8] Chen Lu, Wang Guangcai, Hu Fusheng, et al. Groundwater hydrochemistry and isotope geochemistry in the Turpan Basin, Northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 378-388.

[9] 洪涛, 谢运球, 喻崎雯, 等. 乌蒙山重点地区地下水水化学特征及成因分析[J]. 地球与环境, 2016, 44(1): 11-18. [Hong Tao, Xie Yunqiu, Yu Qiwen, et al. Hydrochemical characteristic study and genetic analysis of groundwater in a key region of the Wumeng Mountain, Southwestern China[J]. Earth and Environment, 2016, 44 (1): 11-18.]

[10] 任孝宗, 刘敏, 张迎珍, 等. 基于Matlab的Durov三线图的实现[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 744-750. [Ren Xiaozong, Liu Min, Zhang Yingzhen, et al. Plotting Durov diagram based on Matlab[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4): 744-750.]

[11] 段东伟. 伊犁河谷西部平原区地下水形成演化研究[D]. 西安:长安大学, 2017. [Duan Dongwei. Groundwater Formation and Evolution in the Western Plain of Yili River Valley[D]. Xi'an : Changan University, 2017.]

[12] 邵杰, 李瑛, 候广才, 等. 新疆伊犁河谷地下水化学特征及其形成作用[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(4): 99-105. [Shao Jie, Li Ying, Hou Guangcai, et al. Chemical characteristic of groundwater in Yili River Valley, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(4): 99-105.]

[13] 邱余波, 陈虹, 杨军峰, 等. 伊犁盆地阔斯加尔铀成矿区西山窑组古地下水动力系[J]. 现代地质2019, 33(2): 431-439. [Qiu Yubo, Chen Hong, Yang Junfeng, et al. Paleo-ground hydrodynamic system of Xishanyao formation in Kuosjiaer Uranium Metallogenic Area, Yili Basin[J]. Geoscience, 2019, 33(2): 431-439.]

[14] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 米热古丽·艾尼瓦尔, 古丽孜巴·艾尼瓦尔, 等. 伊犁绿洲土壤盐渍化与浅层地下水水化学特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 193-200. [Mamattursun Eziz, Hamid Yimit, Anwar Mohammad, et al. Analysis on soil salinization and hydrochemical characteristic of shallow ground water in Yili Oasis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 193-200.]

[15] 邵杰. 新疆伊犁-巩乃斯河谷地下水水循环演化规律研究[D]. 西安:长安大学, 2015. [Shao Jie. Groundwater Circulation and Evolution Pattern in Yili-Gongnaisi Valley of Xinjiang Autonomous Region[D]. Xi'an: Changan University, 2015.]

[16] 伊犁地区水利电力勘测设计院. 新疆伊犁地区地下水资源[R]. 伊犁: 伊犁地区水利电力勘测设计院, 1990. [Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute of Yili District. Groundwater Resources in Yili District Xinjiang[R]. Yili: Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Institute in Yili District, 1990.]

[17] 伊犁哈萨克自治州计划委员会国土办. 伊犁哈萨克自治州国土资源(上册)[M]. 合肥: 黄山出版社, 1993: 138-161. [Land and Resources Office of the Planning Committee in Yili Kazakh Autonomous prefecture. Land and Resources in Yili Kazakh Autonomous prefecture (the First Volume)[M]. Hefei: Huangshan Press, 1993: 138-161.]

[18] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. Sci-

ence, 1970, 170(3962): 1088-1090.

[19] 纪媛媛, 贾瑞亮, 周金龙, 等. 新疆伊犁河谷地地下水质量和污染评价[J]. 节水灌溉, 2014(3): 32-37. [Ji Yuanyuan, Jia Ruiliang, Zhou Jinlong, et al. Assessment of groundwater quality and pollution in Yili River Valley, Xinjiang[J]. Journal of Water Saving and Irrigation, 2014(3): 32-37.]

[20] 栾凤娇, 周金龙, 贾瑞亮, 等. 新疆巴里坤-伊吾盆地地下水水化学特征及成因[J]. 环境化学, 2017, 36(2): 380-389. [Luan Fengjiao, Zhou Jinlong, Jia Ruiliang, et al. Hydrochemical characteristic formation mechanism of groundwater in plain area of Barkol-Yiwu Basin, Xinjiang[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(2): 380-389.]

[21] 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什三角洲地下水化学特征与演化规律[J]. 环境科学, 2019, 42(9): 4041-4052. [Wei Xing, Zhou Jinlong, Nai Weihua, et al. Hydrochemical characteristic and evolution of groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang[J]. Environmental Science, 2019, 42(9): 4041-4052.]

[22] Lin Yun, Ren Huaxin, Wu Yazun, et al. The evolution of hydrogeochemical characteristic of a typical piedmont Karst groundwater system in a coal-mining area, Northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(3): 557.

[23] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram[J]. Applied Geochemistry. 2018, 12(97):doi:10.1016/j.apgeochem.2018. 07. 009.

[24] 钱程, 武雄. 盐池内流区地下水水化学特征及其形成作用[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(3): 169-175. [Qian Cheng, Wu Xiong. Hydrochemical characteristic and formation mechanism of groundwater in inner area in Yanchi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(3): 169-175.]

[25] Xiao J, Jin Z D, Wang J. et al. Hydrochemical characteristics controling factors and solute sources of groundwater within the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2015, 1(10):doi.10.1016/j.quaint. 2015. 01. 021.

[26] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5428-5439. [Liu Jiangtao, Cai Wutian, Cao Yueting, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial Fan of Qinhe River[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5428-5439.]

[27] Wang L H, Dong Y H, Xu Z F, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Northeastern Tennger Desert, northern China[J]. Hydrogeology Journal, 2017, 25(8): doi:10. 1007/s10040- 017-1620-2.

[28] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区地下水水化学特征及其演化驱动机理[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 733-740. [Li Huiya, Feng Qi, Chen Lijuan, et al. Hydrochemical characteristic and evolution mechanism of groundwater in the Minqin Oasis[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 733-740.]

[29] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水化学特诊及控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 4982-4989. [Zhang Tao, He Jing, Li Jingjie, et al. Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River Basin[J]. Environmental Science, 2018, 39(11): 4982-4989.]

[30] Singh N, Singh R P, Kamal V, et al. Assessment of hydrogeochemistry and the quality of groundwater in 24-Parganas districts, West Bengal[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73: 375-386.

[31] 王骞迎. 伊犁河谷西部平原区地下水循环模式与可更新速率研究[D]. 长春:吉林大学, 2020. [Wang Qianying. Research on Groundwater Circulation Mode and Renewable Rate in the Western Plain Area of Yili River Valley[D]. Changchun: Jilin University.]

Chemical characteristics and genesis analysis of groundwater in northwest Yili River Valley

Ailihamu Aikelamu[1,2,3], ZHOU Jinlong[1,2,3], ZHANG Jie[1,2,3], WEI Xing[1,2,3], YU Dong[1,2,3], CHEN Jinsong[1,2,3]

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Center, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: To analyze groundwater genesis and chemical characteristics in Yili River Valley, Xinjiang China, we used descriptive statistical analysis, trilinear chart by Piper, Gibbs diagrams, ion ratio diagrams, and saturation index methods to systematically analyze 35 groundwater samples collected from June to October 2018. Groundwater in the study area is weakly alkaline, with a high total hardness level. The chemical components in groundwater showed little variation throughout the study area; Ca^{2+} was the main cation, and HCO_3^- the main anion. The hydrochemical characteristics in the study area can be divided into five groundwater types, HCO_3−Ca, $HCO_3 \cdot SO_4$−Ca, $HCO_3 \cdot SO_4$−Ca·Mg, $HCO_3 \cdot SO_4$−Ca·Na, and HCO_3−Ca·Mg. Although rock lixiviation is the main contributor to groundwater chemical composition, evaporation-concentration and cation exchange also contribute to the chemical composition of groundwater in the study area. Moreover, some groundwater samples might be affected by human activities. Na^+, Cl^-, and SO_4^{2-} in groundwater are present due to the dissolution of rock salt, gypsum, and other evaporates; the dissolution of minerals such as calcite, dolomite, and gypsum contributes to Ca^{2+} and Mg^{2+} in groundwater.

Keywords: northwest area of Yili River Valley; groundwater; hydrochemical characteristics; Gibbs diagram; ion ratio diagram; Xinjiang